

Список литературы:

1. Стационарные газотурбинные установки: справочник / [Л. В. Арсеньев, В. Г. Тырышкин, И. А. Богов и др.] ; под ред. Л. В. Арсеньева и В. Г. Тырышкина. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 543 с. 2 Нигматулин И. Н. Тепловые двигатели / Нигматулин И. Н., Шляхин П. Н., Ценев В. А. ; под ред. И. Н. Нигматулина. – М. : Высшая школа, 1974. – 375 с. 3. Братута Е. Г. Удосконалена методика розрахунку температурних характеристик теплообмінних апаратів з перехресним плином та їх систем / Е. Г. Братута, А. М. Ганжа // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2008. – № 1. – С. 61–65. 4. Теплопередача и гидравлическое сопротивление: справочник / [С. С. Кутателадзе]. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 367 с. 5. Идельчик И. Е. Справочник по гидравли-

ческим сопротивлениям / Идельчик И. Е. – М. : Машиностроение, 1975. – 559 с.

Bibliography (transliterated):

1. Stacionarnye gazoturbinnye ustanovki: spravochnik / [L. V. Arsen'ev, V. G. Tyryshkin, I. A. Bogov i dr.] ; pod red. L. V. Arsen'eva i V. G. Tyryshkina. – L. : Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1989. – 543 s. 2 Nigmatulin I. N. Teplovyie dvigateli / Nigmatulin I. N., Shljahin P. N., Cenev V. A. ; pod red. I. N. Nigmatulina. – M. : Vysshaja shkola, 1974. – 375 s. 3. Bratuta E. G. Udoskonalena metodika rozrahunku temperaturnih harakteristik teploobminnih aparativ z perehresnim plinom ta ih sistem / E. G. Bratuta, A. M. Ganzha // Energetika: ekonomika, tehnologii, ekologija. – 2008. – № 1. – S. 61–65. 4. Teploperedacha i gidravlichesкое soprotivlenie: spravochnik / [S. S. Kutateladze]. – M. : Jenergoatomizdat, 1990. – 367 s. 5. Idel'chik I. E. Spravochnik po gidravlicheskomu soprotivlenijam / Idel'chik I. E. – M. : Mashinostroenie, 1975. – 559 s.

УДК. 629.113

Г.П. Подзноев, канд. геол.-мин. наук, У.А. Абдулгазис, д-р техн. наук

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ГИДРИДА АЛЮМИНИЯ

Постановка проблемы

Исторически развитие транспортного сектора экономики было тесно привязано к природным ресурсам углеводородных энергоносителей. В рамках этого направления шло также и совершенствование конструкций двигателей. В то же время неуклонно приближается период истощения пригодных к добыче углеводородов, из чего следует, что в ближайшей перспективе должна быть найдена и технически обеспечена адекватная энергетическая альтернатива углеводородам, что и предопределило бурную активизацию исследований по разработке технологий альтернативного энергообеспечения транспорта. Необходимость радикального пересмотра углеводородной концепции энергообеспечения силовых установок транспортных средств диктуется также и кумулятивным разрушением природного экологического равновесия, вызываемого переизбытком не утилизируемых продуктов сжигания топлива, ведущих к серьезным негативным сдвигам в системе человек - природа

Информационный анализ

Наиболее реальной перспективой решения энергетической проблемы для транспорта признается использование водорода, который привлекает высокой энергией сгорания (120 МДж/кг), практически неисчерпаемыми природными ресурсами, неограниченной возобновляемостью и безупречной экологичностью в едином природном кругообороте «вода → (водород + кислород) → вода».

По данным интернет-сайтов [1] практически все энергетические корпорации вкладывают ог-

ромные средства в престижные водородные программы.

Как топливо водород в разработанных на настоящий момент автомобильных двигателях используется в двух принципиально различных вариантах: - в топливных элементах, вырабатывающих электроэнергию для питания электродвигателей, или непосредственно в двигателях внутреннего сгорания с принудительным воспламенением. В последнем случае (BMW 750hL) [2] преимущество состоит в том, что двигатели могут работать на любом из двух видов топлива – и на бензине, и на водороде.

Фирма «Ford» установила на модели Focus C-MAX водородный ДВС (H₂ ICE). Сжатый водород размещался под давлением 35 МПа в трех баках общим объемом 119 литров (2,75 кг), что позволяло автомобилю пройти около 200 км.

Более эффективными считаются водородные системы с топливными элементами (ТЭ), с вдвое большим КПД.

GM в модели Chevrolet Equinox Fuel Cell [3] применила блок топливных элементов мощностью 93 кВт, питающих через никель-металлогидридные аккумуляторы электродвигатель. Водород содержится в углепластиковых баллонах под давлением до 70 МПа. Одной заправки (всего 4,2 кг водорода) хватает на 320 км пробега. Аналогично сконструированы модели Honda Civic FCX и DM Hy-Wire с водородом массой 4,5–4,9 кг (570 МДж) в специальных сверхпрочных баллонах объемом

150–160 дм³ под давлением 35 МПа, обеспечивающих всего 400–450 км пробега.

Как следует из приведенного краткого обзора, водород, как энергоноситель, несмотря на свои теплотехнические и экологические преимущества, обладает весьма серьезными проблемными характеристиками, трудноразрешимыми в разработанных концепциях водородных автомобилей. Наиболее серьезный недостаток водорода – весьма низкая объемная энергоемкость и плотность, требующих использования чрезмерно высоких давлений или весьма низких температур, что сопряжено со сложностью и высокой стоимостью оборудования для его производства, транспортировки, хранения и эксплуатации. Вторая серьезная проблема водорода связана с его весьма высоким взрывным потенциалом при смешивании с кислородом воздуха (24 кг тротилового эквивалента на 1 кг H₂) и наличие под сиденьем его сжатого до 35 МПа заряда (4 – 5 кг) в случае аварийной ситуации может привести к весьма серьезным катастрофическим последствиям.

Более перспективным может быть использование ряда комплексных металлгидридов, особенно на основе гидрида алюминия (AlH₃), в условном адекватном объеме которого (150 дм³) содержится 22,2 кг связанного водорода с энергопотенцией около 2665 МДж [3]. Алюмогидрид легко взаимодействует с водой с выделением удвоенного (44,4 кг) количества водорода с энергопотенциалом уже 5330 МДж, что выше таковой для 150 дм³ бензина (5060 МДж). Кроме этого при гидролизе выделяется значительное количество тепловой энергии (13,2 МДж/кг AlH₃, или около 2918 МДж в варианте 150 дм³ AlH₃). Таким образом, полный энергопотенциал AlH₃ может достигать 8250 МДж, что в 1,6 раза выше адекватного по объему бензина или в 15,3 раза выше, чем для сжатого до 35 МПа водорода.

В работе [4] рассмотрен вариант использования гидрида алюминия в термодинамическом цикле Дизеля, в котором перед адиабатным сжатием введен предварительный процесс гидролиза AlH₃ оборотной водой, получаемой при конденсации пара отходящих газов. Обратная вода к тому же используется для регенерации теплоты отработанных газов. Тем самым достигается значительное увеличение количества полезной работы при адекватности количества вводимой теплоты и термического КПД цикла, но с более мягкими параметрическими характеристиками рабочего тела. Отработавшие газы представляют собой лишь пары воды и инертный азот.

В развитие концепции алюмогидридного энергоносителя было предложено заменить кислород воздуха, как окислитель, на жидкий пероксид водорода [4], содержание активного кислорода в

котором составляет 47%, т. е. значительно выше такового для других веществ. При нагревании пероксид разлагается на кислород и воду. При этом выделяется 2,9 МДж/кг теплоты, что является дополнительным (около 13%) источником энергии, позволяющим снизить расход основного топлива.

В то же время традиционная схема работы типового дизеля характеризуется рядом непродуктивных процессов, к которым следует отнести два практически нерабочих хода поршня в которых происходит выпуск отработавших газов и впуск свежего заряда. То есть один поворот коленчатого вала из двух является по своей сути насосным, но на его совершение тратится энергия рабочего хода, время и ресурс двигателя. Кроме этого существенная доля полезной работы тратится на адиабатное сжатие воздуха.

В первом случае проблема может быть решена использованием в двигателе нового типа принципа двухтактного двигателя [5]. Поскольку при этом процессы очистки и наполнения цилиндров совмещены, двухтактный двигатель более прост в конструкции. Кроме этого мощность двухтактного двигателя, при одинаковых размерах цилиндра и частоте вращения вала, теоретически в два раза больше четырехтактного за счет в два раза большего числа рабочих тактов.

Цель исследований

Одним из затратных процессов цикла двигателя внутреннего сгорания является адиабатное сжатие воздуха или топливной смеси, на выполнение которого расходуется существенная часть получаемой при адиабатном расширении механической работы и необходимость сброса остаточной теплоты и горячих отработавших газов в окружающую среду. Одним из вариантов решения этой проблемы является использование принципа внешнего сгорания, когда процесс формирования рабочего тела с требуемыми термодинамическими характеристиками по давлению и температуре осуществляется в отдельной камере.

В задачу исследований входило проведение термодинамического моделирования и оптимизации основных характеристик полного цикла формирования рабочего тела, совершения работы и регенерации теплоносителя и теплоты в замкнутой системе «гидролизатор – поршневой двигатель». В расчетах учитывались масса исходного энергоносителя (гидрид алюминия), квота теплоносителя (вода), количество регенерируемой теплоты, степень сжатия. Расчетными характеристиками являлись теплота гидролиза, теплота диссоциации пероксида, теплота сгорания водорода, массовая и молярная доли паровой фазы, температура и давление пара на выходе из гидролизатора, в конце адиабатного расширения, остаточная доля теплоты

после регенерации, коэффициент полезного использования теплоты и количество получаемой работы. В первой серии расчетов моделировались варианты с шаговыми значениями массы алюмогидрида (в диапазоне 0,03-0,05г), квоты воды (2-5 г), количества регенерируемой теплоты (1200 -2000 Дж) и степени адиабатного сжатия (5-20) На основе полученных результатов оптимизировались варианты с наиболее приемлемыми значениями температуры и давления.

Во второй серии расчетов по приемлемым вариантам уточнялось наиболее оптимальное сочетание всех параметров и характеристик полного цикла двигателя нового типа, приведенных в табл.1.

Таблица 1. Численные значения параметрических характеристик двухтактного двигателя нового типа в зависимости от массы алюмогидрида и пергидроля, количества регенерируемой теплоты и добавочной воды

Цикл	Дизель	Двигатель нового типа
$m_{\text{гид.г}}$	0,114	0,04
$m_{\text{пероксида.г}}$	-	0,153
$\text{H}_2\text{O.г}$	-	3,0
ε	17	10
$q_{\text{гидролиза}}$	-	725,8
$q_{\text{регенерации}}$	-	2000
$q_{\text{диссоциации}}$	-	219,2
$q_{\text{сгорания}}$	-	967,4
q_1	5083	3912,4
q_2	1995	2375,7
q_3	-	375,7
t_2	298	1100,5
t_3	850	1942,0
t_4	2246	-
t_5	1096	790,6
t_6	-	298
p_2	1,0	1,8
p_3	48,5	63,6
p_4	48,5	-
p_5	3,68	2,58
$\eta_{\text{терм}}$	0,607	-
$\eta_{\text{кит}}$	-	0,904
A	3084	3536,8

В таблице 1 даны: $m_{\text{гид.}}$ - масса гидрида алюминия, подаваемого на гидролиз (г); $m_{\text{пероксида.}}$ - масса пергидроля (H_2O_2), подаваемого в камеру сгорания (г); H_2O - масса добавочной воды на гидролиз (г); ε - степень сжатия рабочего тела; $q_{\text{гидролиза.}}$ - количество генерируемой при гидролизе теплоты (Дж); $q_{\text{регенерации}}$ - количество теплоты, регенерируемой оборотной водой (Дж); $q_{\text{дисс.}}$ - количество теплоты, генерируемой при термической

диссоциации пероксида водорода (Дж); $q_{\text{сгорания}}$ - теплота, получаемая за счет сгорания H_2 (Дж); q_1 - суммарная теплота, введенная в процесс (Дж); q_2 - теплота в конце адиабатного расширения (Дж); q_3 - остаточная теплота после регенерации, выводимая из цикла в окружающую среду (Дж); t_2 - температура паро-водородной фазы перед адиабатным сжатием ($^{\circ}\text{K}$); t_3 - температура паро-водородной фазы после адиабатного сжатия ($^{\circ}\text{K}$); t_4 - температура рабочего тела в конце сгорания ($^{\circ}\text{K}$); t_5 - температура рабочего тела в конце адиабатного расширения ($^{\circ}\text{K}$); t_6 - температура воды после теплообменника; p_2 - давление перед адиабатным сжатием (10^5 Па); p_{3-4} - давление в конце сжатия (10^5 Па); p_5 - давление паро-газовой фазы в конце адиабатного расширения (МПа); η - термический КПД; $\eta_{\text{кит}}$ - коэффициент использования теплоты A - совершаемая работа адиабатного расширения.

Анализ полученных результатов

Общий тепловой баланс процесса формирования рабочего тела в оптимизированном варианте формируется на 18,5% за счет гидролиза алюмогидрида, на 51,1% - регенерируемой теплотой, на 5,6% - термической диссоциацией пероксида водорода и всего на 24,7% - при сгорании основного энергоносителя - водорода.

Рассчитанные наиболее оптимальные значения параметрических характеристик - температуры и давления паровой фазы в гидролизаторе позволяют существенно снизить степень сжатия рабочего тела, уменьшив тем самым затраты энергии на этот процесс. При этом сжатие начинается, когда поршень проходит примерно половину пути к верхней мертвой точке. До этого происходит выталкивание половины отработавшей паровой фазы в выпускной коллектор. Далее поршень перекрывает коллектор и в рабочий цилиндр вводится свежий заряд из камеры внешнего сгорания - гидролизатора. При этом стартовые значения температуры и давления в конце сжатия достаточны для получения полезной работы, соизмеримой с традиционным дизелем.

Поскольку отработавшая паровая фаза по составу идентична рабочему телу, то происходит своего рода внутренняя регенерация (возврат) части остаточной теплоты со своим термическим потенциалом в рабочий процесс без выхода за пределы рабочей камеры (внутренняя циркуляция теплоты). Ушедшая же в коллектор половина отработавшей паровой фазы проходит через теплообменник, пе-

редавая основную долю теплоты оборотной воде на гидролиз, получаемой в конденсаторе.

Выводы

1. Рассмотренный выше вариант двигателя нового типа позволяет существенно упростить процесс формирования рабочего тела по принципу внешнего сгорания и значительно облегчить работу поршневой группы.

2. Практически полная идентичность состава рабочего тела и отработавшей паровой фазы позволяет при движении поршня к верхней мертвой точке совместить процесс вытеснения части отработавшего пара, ввод нового заряда и адиабатное сжатие паровой фазы с почти двукратным снижением степени сжатия. При этом снижаются энергозатраты на процесс сжатия, дополнительно используется инерционная энергия маховика и частично возвращается в процесс остаточная теплота.

3. Ориентировочный расчет эффективности подобного двигателя с внешним формированием рабочего тела на основе алюмогидридного энергоносителя в сравнении с традиционным дизелем показывает, что при адекватной по объему емкости с алюмогидридом пробег автомобиля возрастает в 5,24 раза по сравнению с дизелем или почти в 10,5 раза в сравнении со сжатым до 35 МПа водородом в моделях на топливных элементах, а учитывая снижения затрат на сжатие рабочей смеси и трение, то при одинаковой базовой мощности сможет теоретически проработать более в чем в 13 раз дольше,

чем традиционный дизель.

Список литературы:

1. Бюро международных информационных программ Госдепартамента США. Водород все шире внедряется на транспорте и в электроэнергетике [Электронный ресурс] Режим доступа <http://www.america.gov/st/washfile-russian>.
2. General Motors Generation V fuel cell stack [Электронный ресурс] - Режим доступа. <http://green.autoblog.com/17.08.2009/>.
3. Подзноев Г.П. Металлогидридные системы энергообеспечения транспорта. / Г.П. Подзноев, У.А. Абдулгасис. // Двигатели внутреннего сгорания. – 2004. – С. 32-36.
4. Подзноев Г.П., Возможности использования пероксида водорода в качестве окислителя в двигателях внутреннего сгорания / Г.П. Подзноев, У.А. Абдулгасис // Ученые записки КИПУ. - Вып. 20. 2009. С.15-21.
5. Подзноев Г.П., Абдулгасис У.А. Особенности термодинамического цикла двухтактного Н-Дизеля с использованием алюмогидридного энергоносителя и пероксида водорода. / Г.П. Подзноев, У. А. Абдулгасис // Ученые записки КИПУ. - Симферополь. - Вып. 24. - 2010. - С. 41-47.

Bibliography (transliterated):

1. Bjuro mezhdunarodnyh informacionnyh pro-gramm Gosdepartamenta SShA.. Vodorod vse shire vnedrjaetsja na transporte i vjelektroenergetike [Jelektronnyj resurs] Rezhim dostupa <http://www.america.gov/st/washfile-russian>.
2. General Motors Generation V fuel cell stack [Jelektronnyj resurs] - Rezhim dostupa. <http://green.autoblog.com/17.08.2009/>.
3. Podznov G.P. Metallogidridnye sistemy ijenergoobespechenija transporta. / G.P. Podznov, U.A. Abdulgazis. // Dvigateli vnutrennego sgoranija. – 2004. – S. 32-36.
4. Podznov G.P., Vozmozhnosti ispol'zovanija peroksida vodoroda v kachestve okislitelja v dvigateljah vnutrennego sgoranija / G.P. Podznov. U.A. Abdulgazis // Uchenye zapiski KIPU. - Vyp. 20. 2009. S.15-21.
5. Podznov G.P., Abdulgazis U.A. Osoben- nos-ti termodinamicheskogo cikla dvuhtaktnogo N-Dizelja s ispol'zovaniem aljumo- gidridnogo ijenergo- nositelja i peroksida vodoroda. / G.P. Podznov, U. A. Abdulgazis // Uchenye zapiski KIPU. - Simfero-pol'. - Vyp. 24. - 2010. - S. 41-47.